

反应堆临界热流密度的计算方法研究

张金玲 郭玉君 秋穗正 苏光辉 贾斗南 喻真烷

(能源与动力工程学院)

摘要

对国际上公认的反应堆热工水力分析程序 RETRAN-02 中的临界热流密度 (CHF) 的计算方法及加拿大 CHF 数据表进行了较深入的研究和分析, 编制了微机型反应堆瞬态热工水力分析程序 MITARS, 首次将加拿大的 CHF 数据表引入 MITARS 中, 并用上述两种方法分别对堆芯功率瞬变过程的临界热流密度比 (DNBR) 进行了计算, 其结果两者吻合良好。

关键词: 临界热流密度 临界热流密度比 分析计算

中国图书资料分类法分类号: TL33 TL362.1

符号表

CHF	临界热流密度	kW/m^2	G	质量流速	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
c_{pl}	液体定压比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	H_{fg}	汽化潜热	kJ/kg
D_{hy}	水力当量直径	m	L_h	加热长度	m
D_{he}	加热当量直径	m	p	压力	kPa
q_{BLA}	沸腾长度上平均热流密度	kW/m^2	x	含汽量	
q_{local}	局部热流密度	kW/m^2	ρ_g	饱和蒸气密度	kg/m^3
T_{sat}	饱和温度	K	ρ_l	饱和液体密度	kg/m^3
T_b	流体容积温度	K	ρ_l	过冷液体密度	kg/m^3

0 前言

偏离泡核沸腾的热流密度称为临界热流密度 (CHF)。在反应堆热工水力分析计算中, 无论是判定从泡核沸腾向过渡沸腾的转折点, 以区分该转折点前、后的传热工况及计算过渡沸腾的传热系数, 还是根据最小临界热流密比 (DNBR)_{min} 来评价反应堆的安全性, 都需准确地计算出所考虑条件下的临界热流密度值。

收到日期: 1994-10-15. 张金玲: 女, 1957年2月生, 核能与热能工程系, 讲师, 在职博士生。

预测反应堆堆芯内的 CHF 值是非常复杂的,因为径向和轴向热流密度的分布、棒的间隙等都会对 CHF 值产生一定的影响. 计算 CHF 的关系式很多,1965年,Clenci 等就总结出了 87 个关系式^[1,2],以后还不断出现新的关系式. 人们从多方面试图得到各种情况下的 CHF 值,但其中绝大多数是经验关系式,应用范围窄,当超出其关系式所覆盖的参数范围时,往往会导致不正确、甚至是错误的结论. 为了寻找一个更通用、更准确的方法,前苏联于 1975 年在建造一个标准的 CHF 表方面做了尝试,以后加拿大的 Chalk River 核实验室在此基础上继续工作,终于在 1986 年完成了这个表. 该表将大量的 CHF 实验数据汇集起来,并对每个数据都进行了参数趋向一致性的检验(详细的制表过程见文献[1]),然后按给定的局部参量(p, G, x)查得所要求的 CHF 值. 法国曾把由该表得到的 CHF 值与他们的 OMEGA CHF 实验结果作了比较,证明符合得相当好,因而首先把该表用在反应堆事故热工水力分析程序 CATHARE 中.

查表方法有准确度高、应用范围广、正确的一致性和计算时间少、便于扩充等优点. 我国目前所引进的以及国内所编制的热工水力分析程序大多是采用公式法求 CHF 值,本文结合我们开发的反应堆瞬态热工水力分析程序 MITARS,在使用 CHF 表计算 CHF 值和 $DNBR$ 值方面作了探讨和尝试,并将计算结果与公认的 RETRAN-02 程序中所使用的 CHF 值计算关系式的结果进行了比较和讨论.

1 CHF 值的计算

1.1 RETRAN-02 中引用的关系式^[3]

表 1 列出了国际上公认的 RETRAN-02 热工水力分析程序中使用的的一套计算 CHF 值的关系式和其实验数据基础.

RETRAN-02 使用表 1 中各关系式的规则是

$p > 10\ 342.14$ kPa, 选 B & W-2 关系式(图 2 中 V 区);

$8\ 963.186 \leq p \leq 10\ 342.14$ kPa, 在 B & W-2 和 Barnett 关系式之间插值(图 2 中 IV 区);

$6\ 894.76 < p < 8\ 963.186$ kPa, 用 Barnett 关系式(图 2 中 III 区);

$4\ 998.7 \leq p \leq 6\ 894.76$ kPa, 在 Barnett 和修正的 Barnett 关系式之间插值(图 2 中 II 区);

$p < 4\ 998.7$ kPa, 用修正的 Barnett 关系式(图 2 中 I 区).

若在传热关系式中选择了强迫循环与自然循环相结合的方式,则在 $G < 271.25$ kg/(m²·s)时,选用 Kutateladze 关系式.

1.2 CHF 表

目前有前苏联和加拿大的两种 CHF 数据表^[1,2,4]. 加拿大的 CHF 表 AECL-UOCHFLT (Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), University of Ottawa (UO) CHF Lookup Table) 是在宽广的实验范围内($p = 0.1 \sim 19.6$ MPa、 $G = 0.006 \sim 15.7 \times 10^3$ kg/(m²·s)、 $x = -0.98 \sim 1.0$ 、 $D_{hy} = 0.001 \sim 0.093$ m)获得大量 CHF 的实验数据(15 000 个)基础上导得的,其 CHF 表按 p, g, x 的离散值给出了直径 8 mm 管的 CHF 数值,适用范围为 $p = 0.1 \sim 20$ MPa, $G = 0 \sim 7\ 500$ kg/(m²·s), $x = -0.5 \sim 0.9$;且表中局部参量 p, g, x 的离散间隔较小,因而查表的准确度较高. 本文选用加拿大的 CHF 表,并首次编入微机型瞬态热工水力特性分析程序

中.

表1 CHF表达式及其实验数据基础

关系式	表达式	实验数据基础
B&W-2 关系式	$CHF = 3.155 \times 10^{-3} (1.155 - 16.025 D_{hy})$ $\cdot [3.702 \times 10^7 (4.3604 \times 10^{-4} G)^B$ $- 48.21 G H_{fg}] / [12.71 (2.252 \times 10^{-3} G)^A]$ $A = 0.712 + 3.006 \times 10^{-5} (p - 13790)$ $B = 0.834 + 9.93 \times 10^{-5} (p - 13790)$	均匀加热棒束 207 个数据; $L_h = 1.83 \text{ m};$ $D_{hy} = 0.0051 \sim 0.0127 \text{ m};$ $p = 13800 \sim 16550 \text{ kPa};$ $G = 1020 \sim 5425 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s});$ $x = -0.03 \sim 0.2$
Barnett 关系式	$CHF = 3.15 \times 10^3 \left(\frac{A + B \Delta h_{in} / 2.326}{C + L_h / 0.0254} \right)$ $A = 42.6066 D_{he}^{0.68} G^{0.192} [1.0 - 0.744$ $\cdot e^{(-5.25103 \times 10^{-5} D_{hy} G)}]$ $B = 9.1135 \times 10^{-5} D_{he}^{1.261} G^{0.817}$ $C = 1277.442 D_{hy}^{1.415} G^{0.212}$ 考虑局部参数影响时: $B = 2.0159 \times 10^{-6} D_{hy} G$	轴向均匀加热; 内环直径 = $0.009525 \sim 0.0964692 \text{ m};$ 外环直径 = $0.0139954 \sim 0.1017524 \text{ m};$ $L_h = 0.6096 \sim 2.7432 \text{ m};$ $G = 190 \sim 8498 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s});$ 进口过冷焓 $\Delta h_{in} = 0 \sim 958.3 \text{ kJ}/\text{kg};$ 进口压力 = 6894.76 kPa
修正的 Barnett 关系式	$CHF = 3.155 \times 10^3 (A + B \Delta h_{in} / 2.326)$ $/ (C + L_h / 0.0254)$ $A = 6.78 D_{he}^{0.632} G^{0.663} [1.0 - 0.315$ $\cdot e^{(9.14 \times 10^{-5} D_{hy} G)}] / H_{fg}$ $B = 5.0142 \times 10^{-4} D_{he}^{1.445} G^{0.691}$ $C = 7.333 \times 10^{-3} D_{hy}^{0.0817} G^{0.5866}$	棒束中垂直向上流动; 棒径 = $0.010033 \sim 0.0137922 \text{ m};$ $L_h = 0.83566 \sim 4.4399 \text{ m};$ $p = 1034 \sim 4998 \text{ kPa}$ $G = 40.69 \sim 2305.59 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 进口过冷焓 $\Delta h_{in} = 13.956 \sim 867.5 \text{ kJ}/\text{kg}$
Kutateladze 关系式	$CHF = 1.86636 \times 10^{-5} \left[1 + \frac{9}{5} B (T_{sat} - T_b) \right]$ $\cdot H_{fg} \rho_{gs} \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_{gs})}{\rho_{gs}^2} \right]^{1/4}$ $B = 5.556 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_{gs}} \right)^{0.75} \left(\frac{c_{pl}}{H_{fg}} \right)$	池式沸腾.

表中的数据是在内径为8 mm的圆管、均匀加热的条件下得到的,对于其它情况,采用修正系数进行修正.对于反应堆中的情况,主要引入水力当量直径、轴向热流分布和棒束流动的影响,其修正系数分别为

水力当量直径修正系数

$$K_d = \left(\frac{0.008}{D_{hy}} \right)^{1/3} \quad 0.002 \text{ m} < D_{hy} < 0.016 \text{ m}$$

$$K_d = \left(\frac{0.008}{0.016} \right)^{1/3} = 0.79 \quad D_{hy} > 0.016 \text{ m}$$

轴向热流分布修正系数

$$K_q = q_{BLA}/q_{local} \quad x > 0$$

$$K_q = 1.0 \quad x < 0$$

棒束修正系数

$$K_b = \min(0.8, 0.8 \exp(-0.5x^{1/3}))$$

MITARS 程序中采用上述两种方法计算 CHF 值,以便比较.

2 计算结果

图 1 给出了当压力分别在 B &W-2 和 Barnett 公式的范围内时,由相应的公式得到的 CHF 值和由 CHF 表得到的值的比较.从图 1 知,当超出 B &W-2 公式的适用范围时,计算结果不可靠,尤其是在 x 值较大时,计算结果不合理,甚至出现了负值;Barnett 的结果在 $x > 0$ 时,与 CHF 表符合较好;在 $x < 0$ 时,Barnett 的结果较保守.

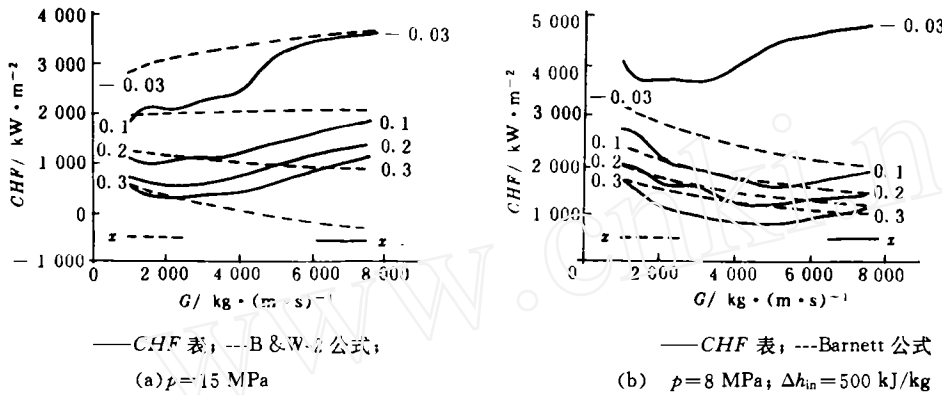


图 1 CHF 表与 B &W-2 和 Barnett 公式结果的比较

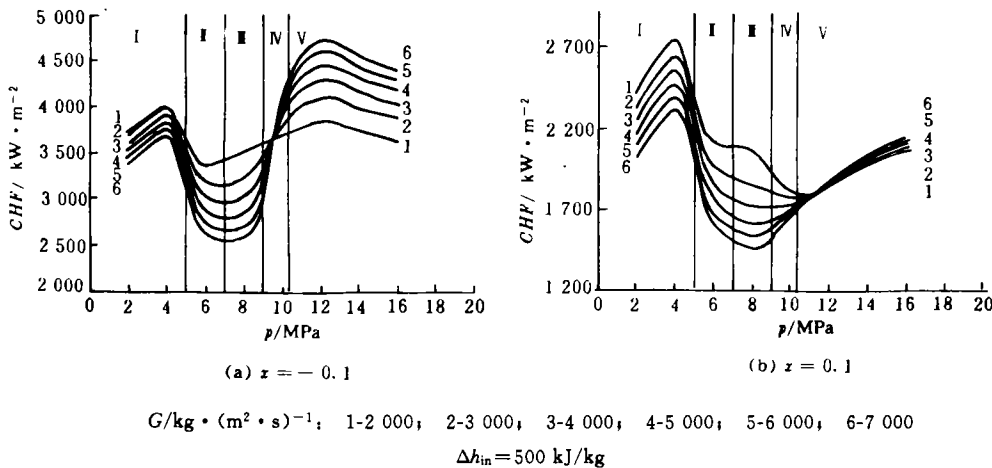
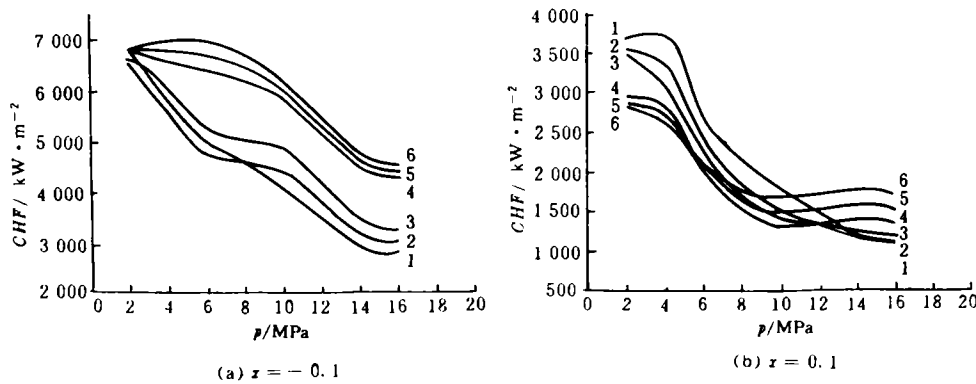


图 2 由表 1 CHF 公式计算的 CHF 值与压力和流量的关系

图 2 和图 3 分别给出了用表 1 给出的公式和 CHF 表得到的临界热流密度值.图 2 表明,在流量较小时,当 $x \leq 0$,Barnett 公式的计算值较其它公式值的偏差大.由图 3 可看出,CHF

表的参数趋向较一致,避免了在不同公式交接处 CHF 值变化较大的缺陷.



$G/\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$: 1-2 000; 2-3 000; 3-4 000; 4-5 000; 5-6 000; 6-7 000

图3 由 CHF 表得到的 CHF 值与压力和流量的关系

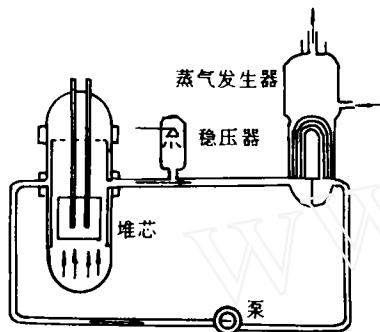


图4 反应堆一次侧系统简图

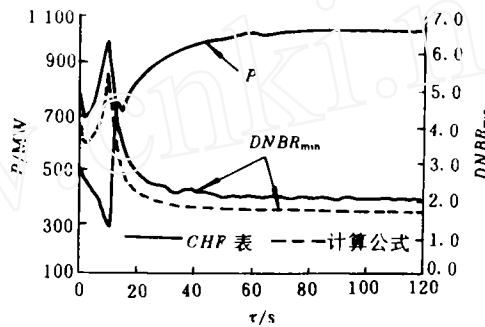


图5 CHF 表和计算公式得到的 $(DNBR)_{\min}$ 随时间的变化

比较图 2a 和图 3a 可知,在 $x < 0$ 且流量较大时 ($> 5\,000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), CHF 表得到的 CHF 值较公式得到的大.但在反应堆常用的压力范围内 (10~16 MPa) 相差不多,即两者符合较好,公式的结果略偏保守,这在下面的实际例子中也得到了证实.

对于图 4 所示的反应堆系统,MITARS 分别用表 1 给出的一套公式和 CHF 表计算了反应堆功率随时间的变化如曲线 P 所示时,热通道内最小 $DNBR$ 随时间的变化规律见图 5.

通过比较可以看出,在所计算的条件下,RETRAN-02 公式计算的结果偏于保守,但与 CHF 表的结果很接近.

3 结 论

在计算系统各参数变化较大的事故工况时,或在系统处于自然循环、流量较小或者为零时,用 CHF 公式难以得到正确的临界热流密度值,此时,建议选用 CHF 表求得临界热流密度值;当系统的工况处于所选公式的参数覆盖范围内时,建议选用该公式计算 CHF 值,因为

CHF 表只能反映压力、流量和含汽量这 3 个局部参数对 CHF 值的影响,对于诸如棒束、热流密度分布、进口条件等参数的影响,则只能给出在整个表的范围内的一致性修正,因而很容易掩盖了某些区域的特殊性。

CHF 表具有计算速度快、可靠、应用范围广及参数影响趋向正确等优点,因而我们建议,在做方案设计或计算较大的工况变化时选用此表;若选用公式计算,应在算得 CHF 值后,按相应的局部参数(p, G, x)与 CHF 表值加以校验。

参 考 文 献

- 1 Groeneveld D C, Cheng S C, Doan T. 1986 AECL-UO critical heat flux lookup table. *Heat Transfer Engineering*, 1986, 7(1~2):46~62
- 2 Groeneveld D C, Leung L K H. Tabular approach for predicting critical heat flux and post-dryout heat transfer. In: Ulrich Müller, Klaus Rehme, Klaus Rust, eds. Proc of 4th Intl Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. Karlsruhe, 1989. 109~114
- 3 Mcfadden J H, Hughes E D, Narum R E, et al. RETRAN-02-A program for transient thermal-hydraulics analysis of complex fluid flow systems, Vol 1. EPRI-NP-1850-CCM, Idaho, 1981
- 4 Krillov P L, Bobkov V P, Vinogradov V N, et al. On standard critical heat flux data for round tubes. In: Ulrich Müller, Klaus Rehme, Klaus Rust, et al eds. Proc of 4th Intl Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics. Karlsruhe, 1989. 103~108

STUDY ON THE CALCULATION METHOD OF THE CRITICAL HEAT FLUX IN REACTOR

Zhang Jinling Guo Yujun Qiu Suizheng Su Guanghui Jia Dounan Yu Zhenwan
(School of Energy and Power Engineering)

Abstract

A deepgoing study was performed on the critical heat flux (CHF) prediction methods used in the well-acknowledged reactor thermal-hydraulic analysis code RETRAN-02 and on the CHF lookup table made-up by Canada. A microcomputer code of transient analysis for the reactor system, MITARS, was developed. The CHF lookup table was incorporated in to the MITARS code. Computations were performed for the DNBR in the transient process of the reactor core power variation by the two codes, and the results accorded well with each other.

Keywords: critical heat flux DNBR analysis calculation